



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
05.03.2003 Patentblatt 2003/10

(51) Int Cl.7: **C23C 8/36, H01J 37/32**

(21) Anmeldenummer: 01121046.5

(22) Anmeldetag: 03.09.2001

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU
MC NL PT SE TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO SI

(71) Anmelder: **C C R GmbH**
Beschichtungstechnologie
53619 Rheinbreitbach (DE)

(72) Erfinder:
• **Hillebrands, Burkard, Professor Dr.**
67661 Kaiserslautern (DE)

- **Demokritov, Serguei O., Dr.**
67663 Kaiserslautern (DE)
- **Roos, Björn F.P.**
67067 Ludwigshafen (DE)
- **Weiler, Manfred, Dr.**
53619 Rheinbreitbach (DE)
- **Dahl, Roland**
53545 Ockenfels (DE)

(74) Vertreter: **Eggert, Hans-Gunther, Dr.**
Räderscheidtstrasse 1
50935 Köln (DE)

(54) **Verfahren zur Herstellung dünner Oxid- oder Nitridschichten**

(57) Um bei der Herstellung dünner Oxid- oder Nitridschichten mittels eines Plasmastrahls aus einer Hochfrequenz-Plasmastrahlquelle nur das Substratmaterial in das entsprechende Oxid oder Nitrid umzuwandeln, ohne die darunterliegende ferromagnetische Schicht anzugreifen, werden die Ionenenergie und Ionenstrahldichte eines dichten hoch ionisierten quasi neutralen Plasmastrahls mit einem hohen Anteil an Sauerstoff oder Stickstoffspezies unabhängig voneinander kontrolliert. Damit kann die Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig von der Penetrationstiefe eingestellt werden und es werden Oxid- oder Nitridschichten hoher Güte erhalten.

nenstrahldichte eines dichten hoch ionisierten quasi neutralen Plasmastrahls mit einem hohen Anteil an Sauerstoff oder Stickstoffspezies unabhängig voneinander kontrolliert. Damit kann die Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig von der Penetrationstiefe eingestellt werden und es werden Oxid- oder Nitridschichten hoher Güte erhalten.

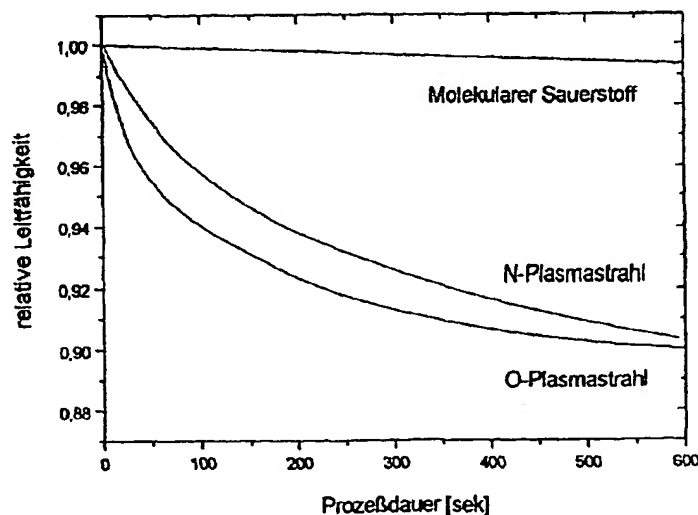


Fig. 2

Process for fabricating of thin nitride- or oxide layers

Description of EP1288329

[0001] Die Erfindung betrifft die Herstellung dünner, elektrisch hoch isolierender Filme aus bestimmten Oxid- oder Nitridschichten, z.B. Al_2O_3 oder AlN , indem der Plasmastrahl einer Hochfrequenz angeregten Plasmastrahlquelle auf ein Substrat gerichtet wird, um das Substratmaterial in das entsprechende Oxid oder Nitrid umzuwandeln.

[0002] Aluminiumoxid (Al_2O_3) ist heutzutage das bevorzugte Tunnelbarrieren-Material für Magnetowiderstands-Sensoren. Besser geeignet als die Oxide sind die Nitride, insbesondere Siliciumnitrid (Si_3N_4) oder auch Bornitrid (BN). Aufgrund der geringen Reaktivität von molekularem Stickstoff können mit den gängigen Verfahren bis dato keine Nitridschichten mit hinreichender Qualität erzeugt werden. Das Problem liegt darin, dass bei den üblichen Verfahren sehr hohe Ionenenergien benötigt werden, um die Nitridbildung einzuleiten. Die hohe Ionenenergie wiederum hat zur Folge, dass dadurch eine sehr grosse Anzahl von Defekten in die Tunnelstruktur eingebaut wird. Qualitativ hochwertige Nitrid-Tunnelbarrieren sind somit nicht bekannt.

[0003] Die Herstellung von Al_2O_3 -Barrierenschichten geschieht üblicherweise, indem eine dünne Al-Schicht (typischerweise 1-2 nm dick) durch einen Zerstäubungs- oder Verdampfungsprozess aufgebracht und anschliessend oxidiert wird. Für den Oxidationsprozess kann dabei die thermische, die natürliche oder die plasmagestützte Oxidation verwendet werden. Die thermische Oxidation in Atmosphäre oder unter Vakuum ist sehr zeitaufwendig, unkontrollierbar und benötigt gegebenenfalls, wie im Fall der Oxidation unter Atmosphäre, dass das Vakuum gebrochen werden muss. Sie ist für die industrielle Herstellung von Oxiden eher unbrauchbar. Für die industrielle Fertigung konzentriert man sich auf die Plasmaoxidation durch eine Standard-Sauerstoff-Gasentladung.

[0004] Die EP-A-913 830 von P.S. Stephen beschreibt ein magnetisches Tunnelkontakt-Bauteil, in welchem die Tunnelbarriere durch Plasmaoxidation von 0,5 - 2 nm dicken Al-Schichten hergestellt wird. In einigen technischen Veröffentlichungen ist in ähnlicher Weise die Herstellung der Al_2O_3 Barrierenschicht durch Plasmaoxidation von Al beschrieben (s. z.B. J.J. Sun et al., Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 448; W.J. Gallagher et al., J. Appl. Phys. 81 (1997) 3741; J.S. Moodera et al., Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3273).

[0005] Bei dem Prozess der Plasmaoxidation einer Al-Schicht zu einer dünnen Al_2O_3 -Schicht können nach dem heutigen Stand der Technik die Reaktionsgeschwindigkeit, d.h. die Anzahl der Aluminium-Sauerstoff-Bindungen pro Zeiteinheit und auch die Penetrationstiefe, d.h. die Eindringtiefe des Sauerstoffteilchens in die Oberfläche bis zu dem Ort, an dem die chemische Bindung erfolgt, nicht kontrolliert werden. Es kommt entweder zu einer nicht vollständigen Oxidation der Al-Schicht oder zu einer nicht gewünschten teilweisen Oxidation der ferromagnetischen Bodenelektrode. In beiden Fällen sinkt der magnetische Widerstand der Tunnelstruktur dramatisch aufgrund einer erhöhten Depolarisation im Übergangsbereich zwischen Bodenelektrode und Barrierenschicht (J.J. Sun et al., Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 448). Da bei der herkömmlichen Plasmaoxidation weder die Massenzusammensetzung noch die Energieverteilung des auf die Oberfläche treffenden Plasmaflusses kontrolliert werden kann, ist die Qualität der Oxidschicht nicht optimierbar. Für einen optimalen Oxidationsprozess in Bezug auf die Optimierung der Materialeigenschaften des Oxids ist es erforderlich, einen in der Ionenenergie, d.h. die kinetische Energie der Ionen, welche

durch ihre Geschwindigkeit bestimmt ist, der Ionenstromdichte, d.h. die Anzahl der Ionen pro Flächen- und Zeiteinheit, sowie der Zusammensetzung (quantitatives Verhältnis der Moleküle, der Ionen und der atomaren Teilchen) wohl definierten bzw. kontrollierbaren Sauerstoffplasmastrahl zu verwenden.

[0006] Was bisher nicht möglich war, ist die unabhängige Variation der Ionenenergie sowie der Ionenstromdichte verbunden mit einem sehr hohen Anteil atomarer Spezies in einem grossflächigen Plasmastrahl. Es gibt bis jetzt kein Verfahren, welches grossflächig, d.h. mit mindestens 100 - 200 cm², einen fast reinen Atomstrahl mit den hier vorliegenden Ionenenergie- und Stromdichtewerten liefert. Der Nachteil üblicher Verfahren liegt darin, dass die für die Oxidation bzw. Nitrierung notwendige Dissoziation des O₂- bzw. N₂-Moleküls allein durch die Stoss-Wechselwirkung des Ions beim Aufprall auf die Oberfläche des zu oxidierenden bzw. zu nitrierenden Materials erreicht wird. Um jedoch diese Stoss-Aktivierung effizient durchzuführen, muss insbesondere bei der Nitridbildung die kinetische Energie des Ions mindestens das Doppelte der Festkörperversetzungsenergie betragen. Die Festkörperversetzungsenergie gibt die Energie an, die benötigt wird, um ein im Volumen des Festkörpers chemisch gebundenes Atom aus seiner Bindung zu lösen und von seiner ursprünglichen örtlichen Position aus auf eine neue Position zu versetzen. Ist die Ionenenergie nun aber mindestens gleich der doppelten Festkörperversetzungsenergie, so sind die Ionen auch in der Lage, unerwünschte Defekte im Oxid oder Nitrid zu erzeugen.

[0007] Die vorliegende Erfindung hat die Aufgabe, eine verbesserte Herstellung dünner Oxid- und Nitridschichten hoher Güte für z.B. die Anwendung in magnetischen Tunnelbarrieren zu ermöglichen.

[0008] Die Aufgabe wird durch die Verwendung einer neuartigen Plasmaquelle gelöst, welche einen dichten hochionisierten, quasi neutralen Plasmastrahl mit einem hohen Anteil an Sauerstoff- oder Stickstoffspezies erzeugt und dabei eine unabhängige Kontrolle der Ionenenergie sowie der Ionenstromdichte erlaubt. Quasi neutral bedeutet, dass in dem Teilchen- bzw. Plasmastrahl pro Volumeneinheit genau gleich viele positive (in der Regel Ionen) als auch negative Ladungsträger (in der Regel Elektronen) vorhanden sind.

[0009] Gemäss dem Verfahren wird der Plasmastrahl auf die Oberfläche dünner Schichten von bestimmten Elementen gerichtet, um sie in Schichten entsprechender Oxide oder Nitride umzuwandeln, wobei eine kontinuierliche, uniforme und defektfreie neue Schicht entsteht. Die Erfindung ermöglicht, dass zum ersten Mal atomare Plasmastrahlen mit wohl definierter kinetischer Energie, vorzugsweise zwischen der Oberflächenbindungsenergie und der Festkörperversetzungsenergie, zur Herstellung von Oxid- bzw. Nitridschichten eingesetzt werden können. Die Oberflächenbindungsenergie ist die Energie, die benötigt bzw. aufgebracht werden muss, um ein an der Festkörperoberfläche chemisch gebundenes Atom aus seiner chemischen Bindung zu lösen.

[0010] Eine derartige Plasmaquelle ist detailliert in der eingereichten deutschen Patentanmeldung "Hochfrequenz-Plasmaquelle" mit dem Aktenzeichen 100 08 482.6 der Firma CCR GmbH, Beschichtungstechnologie beschrieben, und als COPRA Plasma Source 160 CF oder 200/CF im Handel.

[0011] Wirtschaftlich interessante Elemente zur Oxidation bzw. Nitridbildung sind: Al (Al₂O₃/AlN), Mg (MgO), Ga (GaN), Ta (Ta₂O₅/TaN), Ti (TiN/TiO₂), Zn (ZnO), Zr (ZrN/ZrO₂), Y (Y₂O₃), YSZ [Yttria-stabilized-Zirconia], Si (SiO₂/Si₃N₄), Ge (GeO), B (BN), C (CN_x).

[0012] Es können auch Verbundmaterialien, wie z.B. SiO_xN_y hergestellt werden, wobei

gerade SiOxNy wirtschaftlich sehr interessiert.

[0013] Das Verfahren gemäss der vorliegenden Erfindung besitzt eine Reihe von Vorteilen gegenüber den konventionellen Oxidations-/Nitridationstechniken. Die Plasmastrahlquelle erzeugt bei sehr geringen Prozessdrücken von weniger als 10^{-2} mbar Plasmadichten in der Grössenordnung von 10^{12} cm $^{-3}$, wobei die Energie E der Ionen zwischen 10 und 1.000 eV kontinuierlich eingestellt werden kann. Die Ionenenergieverteilung $\Delta E/E$, d.h. die Geschwindigkeitsverteilung der Ionen, ist bei dieser Plasmastrahlquelle kleiner 10 % und somit sehr schmal. Die Energie der Ionen kann somit sehr präzise eingestellt werden. Im Falle von zweiatomigen Gasen, wie O₂ und N₂ wird ein Dissoziationsgrad, d.h. das Verhältnis der atomaren Teilchenzahl zur absoluten Zahl von Teilchen im Plasma, von über 80 % erreicht. Konventionelle Plasmaquellen erzielen maximal 30 %. Zusätzlich wird ein Ionisationsgrad, d.h. die Zahl der Ionen im Verhältnis zur Gesamtzahl der Teilchen im Plasma, von mindestens 25 % erreicht, im Vergleich zu etwa 5 % in konventionellen Plasmaentladungen. Insofern wird der Prozess der Oxidation bzw. Nitridation durch den Einsatz von atomaren Teilchen höchst effizient. Die Geschwindigkeit des Prozesses wird über die Ionenstromdichte gesteuert. Die Reaktionsgeschwindigkeit kann dabei zwischen 5×10^{14} bis 5×10^{16} Bindungsprozessen pro Sekunde betragen. Die Tiefe des Oxidations- bzw. Nitridationsprozesses kann durch eine definierte Auswahl der Ionenenergie kontrolliert werden. Typische Eindringtiefen sind 1 bis 10 nm, wobei die Eindringtiefe bis auf $\pm 0,1$ nm genau gesteuert werden kann.

[0014] So wird mit sehr hoher Präzision nur die zu bearbeitende Schicht behandelt und eine Beeinflussung der darunter liegenden Schichten wird vermieden. Der geringe Prozessgasdruck und die kurze Prozesszeit gewährleisten, dass praktisch keine schädlichen Verunreinigungen während des Schichtwachstums in die Barrierenschicht eingebaut werden. Durch Hinzufügen von Argon zu dem Prozessgas (O₂ oder N₂) werden günstige Voraussetzungen geschaffen, dass Grenzflächen zwischen den ferromagnetischen Elektroden und der Isolierschicht mit reduzierter Oberflächenrauigkeit entstehen. Dieses Verfahren ist voll kompatibel mit existierenden Produktionssystemen und schliesst ein Brechen des Vakuums aus.

[0015] Die erfindungsgemässe Herstellung der Oxide bzw. Nitride erfolgt kontrolliert und effizient mit hoher Präzision und Reproduzierbarkeit. Eine der möglichen Anwendungen ist die Herstellung von Magnetwiderständen in Tunnelstrukturen, um die Isolierung zwischen den ferromagnetischen Elektroden sicherzustellen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten bestehen in der Erzeugung von Diffusionsbarrieren, der Erzeugung von Isolationsschichten bei der Herstellung von integrierten Halbleiterschaltkreisen oder der Erzeugung von Isolationsschichten für kapazitive Bauelemente, wie z.B. Kondensatoren.

[0016] Die folgende Ausführung beschreibt anhand der Zeichnungen die Herstellung von Magnetowiderstands-Sensoren (auch Tunnelstruktur genannt) aus Aluminiumoxid (Al₂O₃), beispielhaft die Herstellung dünner, elektrisch hoch isolierender Schichten entsprechend der vorliegenden Erfindung.

Fig. 1a zeigt (schematisch) den Oxidationsprozess bei der Herstellung von Magnetowiderstands-Sensoren oder Tunnelstrukturen

Fig. 2 zeigt die Veränderung der relativen Leitfähigkeit einer 10 nm dicken Aluminium-Schicht

Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit der Oxidationstiefe von der Ionenenergie

Fig. 4 zeigt die Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit von der Ionenstromdichte

[0017] Fig. 1a zeigt den Oxidationsprozess am Beispiel einer Tunnelstruktur. Auf dem

Siliziumsubstrat (1) wurden eine ferromagnetische Elektrode (2) sowie eine Aluminiumschicht (3) mit definierter Dicke (etwa 1 - 2 nm) aufgebracht. Die Aluminiumschicht (3) wurde wie üblich durch Sputtern oder Elektronenstrahlverdampfen aufgetragen. Danach wird die Aluminiumschicht (3) oxidiert, indem sie dem Teilchenstrahl (4) der Plasmaquelle COPRA (5) ausgesetzt wird. Fig. 1b zeigt den prinzipiellen Aufbau einer fertigen Tunnelstruktur: Siliziumsubstrat (1), untere ferromagnetische Elektrode (2), oxidierte Aluminiumschicht (6) sowie die im Anschluss an den Oxidationsprozess aufgebrachte obere ferromagnetische Elektrode (7). Der Oxidationsprozess verläuft um so schneller, je höher der Anteil an atomarem Sauerstoff und je grösser die Ionenstromdichte im Teilchenstrahl ist. Die Oxidationstiefe, d.h. die mittlere Eindringtiefe, kann über die Ionenenergie sehr gut eingestellt und kontrolliert werden. Da der Teilchenstrahl eine sehr schmale Energieverteilung von weniger als 10 % der mittleren Energie aufweist, kann präzise jede Ionenenergie zwischen der Oberflächenbindungsenergie und der Oberflächenaktivierungsenergie, d.h. etwa zwischen 10 und 50 eV, eingestellt werden. Somit werden Schadstellen vermieden und gute Schichtqualitäten sichergestellt. Üblicherweise kann Argon dem Prozessgas beigemischt werden, um die Oberflächenrauigkeit der Oxidschicht zu verringern. Nach Abschluss der Oxidation erhält man eine dünne stöchiometrische Al_2O_3 -Schicht.

[0018] Fig. 2 zeigt den Vorteil eines hauptsächlich aus atomaren Spezies (O oder N) bestehenden Teilchenstrahls gegenüber einer Behandlung mit molekularem Sauerstoff. Der molekulare Sauerstoff bewirkt innerhalb einer Behandlungsdauer von 10 min praktisch keine Oxidation bzw. Änderung der Leitfähigkeit. Ein atomarer Sauerstoff- bzw. Stickstoff-Teilchenstrahl dagegen verursacht einen erheblichen Abfall der relativen Leitfähigkeit, da die Metallschicht effizient oxidiert bzw. nitriert wird.

[0019] Das oben beschriebene Verfahren kann unter Verwendung von Stickstoff als Prozessgas ebenso zur Bildung dünner AlN -Schichten genutzt werden. Ebenso können weitere Schichten wie z.B. NiO , MgO oder BN hergestellt werden.

[0020] Die Dicke der gewünschten Schicht wird über die Ionenenergie, die Geschwindigkeit der Oxidation bzw. Nitrierung über die Ionenstromdichte eingestellt. Fig. 3 und Fig. 4 verdeutlichen diesen Zusammenhang am Beispiel der Oxidation von Aluminium. Die gewünschte Ionenenergie wird durch eine in der Plasmaquelle integrierte Regelung eingestellt. Die Ionenstromdichte wird über die eingespeiste Hochfrequenz-Leistung variiert.

[0021] Ein Ion mit einer bestimmten kinetischen Energie verliert nach dem Eindringen in den Festkörper, d.h. auf dem Weg in die Tiefe, kontinuierlich an Energie. Nach Durchlaufen einer bestimmten Wegstrecke ist seine gesamte ursprünglich vorhandene Energie aufgebraucht und es kommt zur Ruhe. Dort wo es zu Ruhe kommt, gibt es eine chemische Bindung. Die maximale Reichweite, d.h. die Eindringtiefe eines Ions, ist somit eine Funktion der kinetischen Energie, welche die Ionen beim Eintreten in die Oberfläche besitzen. Die Umwandlung einer dünnen Aluminiumschicht in eine Aluminiumoxidschicht läuft dann wie folgt ab: Steht die Oberfläche der Aluminiumschicht unter kontinuierlichem Beschuss durch einen Ionenstrahl, so dringen zuerst die Sauerstoffionen, abhängig von ihrer kinetischen Energie, in die entsprechende Tiefe vor und oxidieren dort das Aluminium vollständig. Sind an dieser Stelle alle möglichen Bindungsplätze besetzt, so wandern die Sauerstoffatome wieder zurück in Richtung Oberfläche und gehen an dem nächst freien Bindungsplatz eine chemische Bindung ein. Dies geschieht solange bis die gesamte Oberflächenschicht in Oxid umgewandelt wurde. Die Oxidation verläuft also von der Tiefe heraus an die Oberfläche. Gleiches gilt für den Nitrierungsprozess.

[0022] In Fig. 3 ist der lineare Zusammenhang zwischen Penetrationstiefe und der Ionenenergie dargestellt. Über die Variation der Ionenenergie kann somit sehr präzise

die maximale Dicke der oxidierten Schicht eingestellt werden.

[0023] Die Ionenstromdichte bestimmt, wie viele Sauerstoffatome pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit auf die Oberfläche des zu oxidierenden bzw. nitrierenden Materials treffen. Bei einem atomaren Plasmastrahl mit einer Ionenstromdichte von 1 mA/cm^2 bedeutet dies, dass etwa 6×10^{15} Atome/cm² s auf die Oberfläche treffen und somit für die Oxidation bzw. Nitrierung zu Verfügung stehen. Wie schnell die für die vollständige Oxidation bzw. Nitrierung eines bestimmten Volumens notwendige Gesamtdosis an Sauerstoffatomen erreicht ist, wird somit durch die Ionenstromdichte bestimmt.

[0024] Wie in Fig. 4 dargestellt, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Prozessgeschwindigkeit und der Ionenstromdichte.

[0025] Die Einstellbarkeit der Ionenenergie sowie der Ionenstromdichte ermöglichen somit die erfindungsgemäße Herstellung besonders hochwertiger, d.h. defektfreier Schichten mittels dem Verfahren der dynamischen Tiefenoxidation bzw. Tiefennitrierung.

[0026] Berücksichtigt man, dass die Umwandlung in ein Oxid oder ein Nitrid von der Tiefe zur Oberfläche geschieht, so liegt es nahe, die Eindringtiefe der reaktiven Spezies (N oder O) zeitlich auf die Wachstumsgeschwindigkeit abzustimmen. Bei konstanter kinetischer Energie und konstanter Stromdichte ist nach der Zeit t_0 ein Volumenbereich ΔV in der Tiefe vollständig umgewandelt. Ein weiteres Eindringen von O- oder N-Atomen in diesen Bereich kann sich für die Ausbildung eines qualitativ hochwertigen Oxids oder Nitrids nur nachteilig auswirken. Bei weiterem Beschuss eines bereits vollständig oxidierten, nitrierten Bereichs kann es somit in diesem Bereich zur Bildung von Defekten kommen. Es entsteht ein minderwertiges Oxid oder Nitrid.

[0027] Der erfindungsgemäße dynamische Nitrierungs- bzw. Oxidationsprozess läuft dann wie folgt ab: Zuerst wird die gewünschte Schichtdicke über die Eindringtiefe durch die Wahl der entsprechenden Energie festgelegt. Diese Energie gilt als Ausgangswert und bestimmt die maximale Prozesstiefe. Die Wahl einer bestimmten Stromdichte bestimmt die Ausbreitungs- bzw. Wachstumsgeschwindigkeit des Oxid- bzw. Nitrid-Bereiches zur Oberfläche hin. Die Ionenenergie wird nun kontinuierlich in dem Masse verringert, dass die eindringenden Atome stets nur in eine solche Tiefe vordringen, in der Sauerstoff- bzw. Stickstoffatome noch zur chemischen Bindung benötigt werden. Zur Oxidation einer Aluminiumschicht wird z.B. bei einer Energie von 40 eV und einer Stromdichte von $0,24 \text{ mA/cm}^2$ eine Ausgangstiefe (maximale Prozesstiefe) von 1 nm eingestellt. Die Wachstumsgeschwindigkeit beträgt 0,2 nm pro sec. Die Energie wird dabei innerhalb von 5 Sekunden von 40 auf 0 eV kontinuierlich reduziert.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

Process for fabricating of thin nitride- or oxide layers

Claims of EP1288329

1. Verfahren zur Herstellung dünner Oxid- oder Nitridschichten mittels eines Plasmastrahls aus einer Hochfrequenz-Plasmastrahlenquelle, um das Substratmaterial in das entsprechende Oxid oder Nitrid umzuwandeln, dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionsgeschwindigkeit unabhängig von der Penetrationstiefe eingestellt werden kann.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionsgeschwindigkeit über die Ionenstromdichte des Teilchenstrahls eingestellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Reaktionsgeschwindigkeit über den Ionisations- oder Dissoziationsgrad des Teilchenstrahls eingestellt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Penetrationstiefe über die Ionenenergie des Teilchenstrahls eingestellt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Energie der Ionen des Teilchenstrahls gleichförmig ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Energie der Ionen des Teilchenstrahls zwischen der Oberflächenbindungsenergie und der Festkörperversetzungsenergie liegt.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Plasmastrahl einen Anteil an atomaren Teilchen von über 70 % aufweist.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Prozessdruck von weniger als 10^{-2} mbar gearbeitet wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Behandlung bei Temperaturen von 50 DEG C bis 150 DEG C stattfindet.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass dem Prozessgas aus O₂ oder N₂ Argon hinzugefügt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das in das entsprechende Oxid oder Nitrid umzuwandelnde Substratmaterial Aluminium, Magnesium, Gallium, Tantal, Titan, Zink, Zirkonium, Yttrium, Nickel, Silicium, Germanium, Bor oder Kohlenstoff ist.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass man die Ionenenergie, ausgehend von einem Wert für die maximale gewünschte Eindringtiefe, in dem Masse verringert, dass die Sauerstoff- oder Stickstoffatome nur in eine solche Tiefe vordringen, in der sie noch zur chemischen Bindung benötigt werden.

